

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20251460

基于遗传算法的宿迁黄河故道闸坝群生态补水调度多目标优化研究

李传龙¹, 顾一成¹, 王思如¹, 胡继成², 刘米雪¹, 姚 轶¹, 宋亚倩¹

(1. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 宿迁市市区河道管理中心, 江苏 宿迁 223800)

摘要: 多水源—闸坝群联合调度优化是平衡水网调度过程中水位—水质—水效—水费等多目标的重要手段。以宿迁黄河故道梯级调度系统为研究对象, 考虑水位控制、水质达标与降本增效目标, 耦合水动力—水质模型与 NSGA-II 算法, 构建了多水源—闸坝群生态补水调度优化模型, 采用“方案生成—过程模拟—效果评价—反馈优化”机制, 迭代求解了 Pareto 最优解集, 并结合熵权法筛选了综合最优调度解。结果显示, 研究区水位、水质、效率、成本四类目标间存在显著的多目标冲突特性, 成本与效率呈反向制约, 水质与水位的关联具有非单调性, 效率与水位存在正向协同区间, 成本与水质相互约束, 闸坝群联合调度优化模型能够有效平衡这四类目标, 综合最优解下相应目标值分别为 0、0.09、0.24、0.12, 相较于单目标最优解实现了水位、水质、效率与成本的统筹优化。研究提出的闸坝群联合调度优化方法能够为解决多水源、多工程、多目标的优化调度问题提供重要支撑。

关键词: 黄河故道; 闸坝群联合调度; 水动力—水质耦合模型; 多目标优化模型; NSGA-II 算法; 熵权法

中图分类号: TV697.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0212-05

Multi-objective Optimization of Ecological Water Supplement Scheduling for Gate and Dam Groups for Suqian Yellow River Old Course Based on Genetic Algorithm

LI Chuan-long¹, GU Yi-cheng², WANG Si-ru¹, HU Ji-cheng², LIU Mi-xue¹, YAO Yi¹, SONG Ya-qian¹

(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Suqian Urban River Management Center, Suqian 223800, China)

Abstract: The joint optimal operation of multi-source gate-dam groups is the key to balance multiple objectives like water level, water quality, water efficiency, and costs in water network scheduling. This study focuses on the cascade scheduling system of the Suqian Yellow River Old Course. Considering water level control, water quality compliance, cost reduction, and efficiency improvement, a multi-source gate-dam joint scheduling optimization model was established by coupling a hydrodynamic-water quality model with the NSGA-II algorithm. Using the mechanism of "scheme generation-process simulation-effect evaluation-feedback optimization", the Pareto optimal solution set was iteratively solved. The comprehensive optimal scheduling solution was determined by the entropy weight method. The results show that the significant multi-objective conflicts among water level, water quality, efficiency, and cost in the study area; The cost and efficiency are inversely constrained; The relationship between water quality and water level is non-monotonic; There is a positive synergy interval between efficiency and water level; The cost and water quality mutually restrict each other; The proposed model can effectively balance these four objectives, with the comprehensive optimal solution yielding values of 0, 0.09, 0.24, and 0.12, respectively, achieving integrated optimization compared to single-objective solutions. The proposed method can provide crucial support for solving optimal scheduling problems involving multiple water sources, projects, and objectives.

Key words: Yellow River Old Course; gate-dam groups joint operation; hydrodynamic-water quality coupling model; multi-objective optimization model; NSGA-II algorithm; entropy weight method

收稿日期: 2025-08-19, **修回日期:** 2025-09-29, **接受日期:** 2025-10-05

基金项目: 江苏省水利科技项目(2023028)

作者简介: 李传龙(1993-), 男, 硕士、工程师, 研究方向为区域水问题综合治理, E-mail: 455903687@qq.com

通讯作者: 王思如(1993-), 女, 博士、高级工程师, 研究方向为水文水资源, E-mail: srwang@nhri.cn

1 引言

随着我国生态文明的深入践行与幸福河湖建设的全面推进,生态补水已成为水资源优化配置的核心目标之一。近年来,我国印发的《重点流域水生态环境保护规划》等纲领性文件,明确将生态流量管控列为流域管理刚性约束,将生态调度作为维护河流生态健康的必要手段。当前,随着流域及城市水利工程体系的逐步完善,以多水源协同、多工程联动为核心特征的调度模式已成为流域和城市水资源配置体系的主流形态^[1]。然而,多水源补水中的水量波动性、水质差异性、成本约束性等复杂条件与多工程调度中工程间调度规则耦合难、多目标优先级动态协调难等现实问题,均给闸坝群生态补水调度的多目标优化实施带来显著挑战^[2]。现有研究^[3-4]面对多水源协同配置与工程群联合调控交织的复杂决策难题,围绕优化算法与数值模型耦合构建多目标优化模型,在提高水资源利用效率、保障生态流量等方面取得显著成效,但常忽视水源补给效率与成本约束,未形成涵盖经济、效率与生态效益的多目标协同优化体系。鉴此,本文以宿迁黄河故道为研究对象,兼顾河道梯级闸坝群调控体系和骆马湖、中运河多源协同补给特征,提出水动力—水质数值模型及其与智能优化算法的耦合模型,探索水量优化分配、水质动态响应与水经济效益平衡的生态补水调度调控模式,为闸坝群生态补水调度研究提供技术支撑。

2 研究区概况及数据情况

2.1 研究区域概况

宿迁黄河故道全长 114.3 km,河道经皂河电灌站(P1)、七堡枢纽(P2)、船行枢纽(P3)和古黄河一站和二站(P4)等引水工程连通骆马湖、中运河等外部水源,沿线构建了 12 级梯级闸坝拦蓄系统。本文将闸坝工程自上而下划分为 A~L 段,由于黄河故道被徐洪河截断,且成子河分洪闸以下有独立的供配水系统,故本文研究皂河地涵至成子河分洪闸段(A~I 段,全长 80.36 km),并分别命名各河段为 R1~R8(图 1)。

2.2 研究数据

2.2.1 引水水源

宿迁黄河故道生态补水水源为骆马湖与中运河,其中骆马湖通过七堡枢纽引水,中运河则经皂

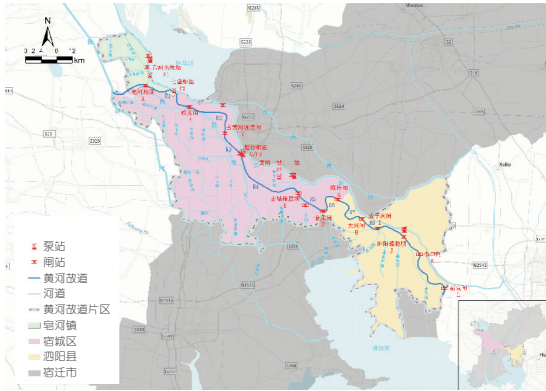


图 1 宿迁黄河故道水利工程布局

Fig. 1 Layout of water conservancy projects in Suqian Yellow River Old Course

河电灌站、船行枢纽及古黄河一、二站实现多节点输水。引水水源水质以 COD、NH₃-N、TP 为表征指标。水源综合水费由用水水价和泵站电费构成,其中用水水价依据宿迁市规定,统一按 0.08 元/m³ 执行,泵站电费根据历史运行电费和引水水量综合计算单位成本。具体引水水源特征参数见表 1。

表 1 引水水源特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of water sources for diversion

引水水源	水源水质			引水工程	引水能力	水源综合水费
	COD	NH ₃ -N	TP			
骆马湖	14.56	0.16	0.04	七堡枢纽	10	0.097
中运河	14.98	0.22	0.08	皂河电灌站	9	0.105
				船行枢纽	12	0.101
				古黄河一站、二站	20	0.100

注:水源水质、引水能力、水源综合水费单位分别为 mg/L、m³/s、元/m³。

2.2.2 河道水位

宿迁黄河故道水位管控采用常水位、警戒水位和起调水位三级体系(图 2)。常态工况下,R1~R8 段河道水位维持在 17.0~23.5 m;警戒水位严格约束补水上限,R1~R8 段控制在 19.00~24.22 m;河道遵循起调水位响应机制,当 R1~R8 段河道水位降至 16.5~23.0 m 时,经引水工程补水至常水位。

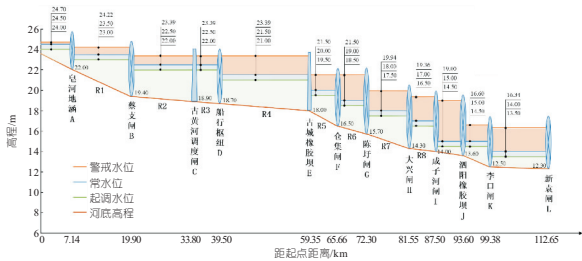


图 2 宿迁黄河故道梯级闸坝拦蓄系统高程图

Fig. 2 Elevation map of cascade gate-dam impoundment system in Suqian Yellow River Old Course

2.2.3 河道水质与污染源

宿迁黄河故道设有黄河新桥省考断面(R2段)和皂河黄河新桥市考断面(R1段),根据《宿迁市 2024 年度生态环境状况公报》,两处水质考核断面均达到地表水Ⅲ类水质标准。据此采用Ⅲ类水质标准限值(COD 为 20 mg/L,NH₃-N 为 1.0 mg/L,TP 为 0.2 mg/L)作为河道水质本底值。研究河段污染源涵盖点源、面源和内源,污染负荷计算结果见表 2。

表 2 研究河段污染入河总量计算

Tab. 2 Calculation of pollution input into study river reach

河段区间	COD	NH ₃ -N	TP
A-B	358.59	41.40	5.51
B-D	1 335.09	34.69	5.88
D-E	529.13	63.66	7.83
E-I	870.84	112.00	13.70

3 多水源—闸坝群联合调度优化模型

构建多水源—闸坝群生态补水调度优化模型,通过集成水动力—水质耦合模型、多目标优化模型和 NSGA-II 算法^[5],实现宿迁黄河故道“水位—水质—效率—成本”多目标协同优化,模型总体框架见图 3。

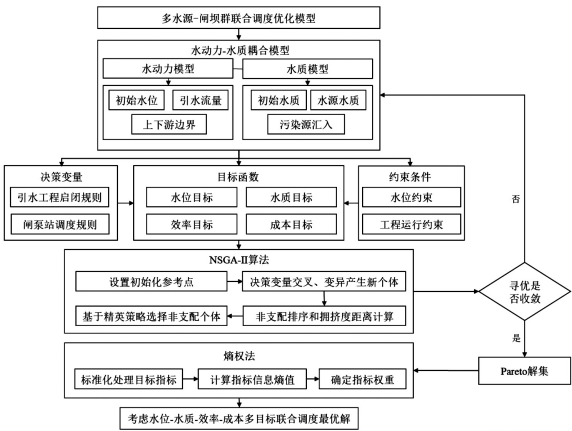


图 3 模型总体框架

Fig. 3 Overall model framework

3.1 水动力—水质耦合模型

研究依托 ICM 平台构建水动力—水质耦合模型,模型概化范围为皂河地涵至成子河分洪闸段,如图 4(a)。模型设置 A、I 两处闸站闭边界,各河段初始水位和初始水质设置为起调水位和Ⅲ类水质标准限值。边界条件方面,引水工程取泵站引水能力作为固定引水流量,入河污染源按固定流量和固定污染物浓度均匀向河道排放。

河道水动力模型参数主要为河道糙率,依据

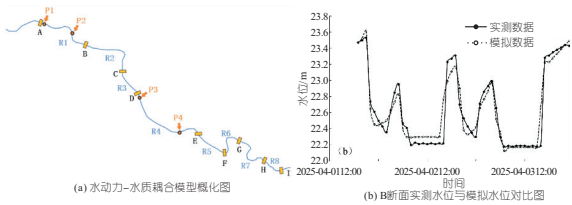


图 4 水动力—水质耦合模型概化图和

B 断面实测水位与模拟水位对比图

Fig. 4 Schematic diagram of hydrodynamic-water quality coupling model and comparison between measured and simulated water levels at section B

《给水排水设计手册:第 1 册 常用资料》(第 2 版)^[6]取值标准,确定研究区域河道糙率初始范围为 0.030~0.035。率定后河道糙率取 0.035,对比调水周期中 B 断面实测和模拟水位数据,如图 4(b),得到 E_{NSE} 系数为 0.96,表明模型对水位过程的模拟结果与实测数据吻合度较高,能有效模拟河道水流运动特征。水质模块参数主要为 COD、NH₃-N、TP 降解系数,参考研究区域已有研究成果,降解系数分别取 0.012/d、0.021/d、0.02/d^[7]。

3.2 多目标优化模型

3.2.1 目标函数

(1)水位目标函数。水位目标函数评分结果越小,目标水位偏差越小。

$$F_{WL} = \begin{cases} \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \frac{H_{in} - H_i(t)}{H_{in} - H_{i0}} & H_i < H_{in} \\ 0 & H_{in} \leq H_i < H_{if} \end{cases} \quad (1)$$

式中, F_{WL} 为水位目标函数值; H_{in} 为第 i 段河道的目标水位,m; $H_i(t)$ 为第 i 段河道在 t 时刻的水位,m; H_{i0} 为第 i 段河道的起调水位,m; H_{if} 为第 i 段河道的警戒水位,m。

(2)水质目标函数。水质目标函数评分结果越小,水质超标历时越短。

$$F_{WQ} = \frac{1}{T} \max \sum_{i=1}^T (1 - D_i(t)) \quad (2)$$

式中, F_{WQ} 为水质目标函数值; T 为调度周期总时间,h; $D_i(t)$ 为第 i 段河道 t 时刻水质指标达标判定函数。

(3)效率目标函数。效率目标函数评分结果越小,调度周期越短。

$$F_E = \frac{\max(\min\{t \mid \sum L_i(t) = 8\}, \min\{t \mid \sum D_i(t) = 8\}) - 1}{T_{\max} - 1} \quad (3)$$

式中, F_E 为效率目标函数值; $L_i(t)$ 为第 i 段河道

t 时刻水位指标达标判定函数; $T_{\max}$ 为理论调度周期最长时, h 。

(4) 成本目标函数。成本目标函数评分结果越小, 综合成本越低。

$$C = \sum_{i=1}^4 (C_{wi} + C_{pi}) \sum_{t=1}^T q_i(t) \Delta t \quad (4)$$

$$F_C = (C - C_{\min}) / (C_{\max} - C_{\min}) \quad (5)$$

式中, C 为单次调度周期的总成本, 元; C_{wi} 为第 i 个引水工程的单位水价, 元/ m^3 ; C_{pi} 为第 i 个引水工程单位引水量电费, 元/ m^3 ; $q_i(t)$ 为第 i 个引水工程 t 时刻的引水流量, m^3/s ; Δt 为单个引水工程的引水时长, s ; F_C 为成本目标函数值; $C_{\min}$ 为理论最小成本; $C_{\max}$ 为理论最大成本。

3.2.2 决策变量

以引水工程、河道闸坝工程为主要调控对象, 结合实际调度运行要求, 多目标优化模型选取单次调度周期内引水工程、河道闸坝的开启和关闭时间为决策变量。

3.2.3 约束条件

(1) 水位约束。河道水位约束需同时满足河道最低水位保障与防洪安全双重要求, 水位约束函数表达式为:

$$H_{i,\min} \leq H_i(t) \leq H_{i,f} \quad (6)$$

式中, $H_{i,\min}$ 为第 i 段河道的最低允许水位, m 。

(2) 工程运行约束。引水工程和闸坝过水能力需满足设计要求, 工程运行约束函数表达式为:

$$0 \leq q_i(t) \leq q_{i\max} \quad (7)$$

$$0 \leq Q_i(t) \leq Q_{i\max} \quad (8)$$

式中, $q_i(t)$ 为第 i 个引水工程 t 时刻的引水流量, m^3/s ; $q_{i\max}$ 为第 i 个引水工程设计最大引水流量, m^3/s ; $Q_i(t)$ 为第 i 个闸坝工程 t 时刻的过水流量, m^3/s ; $Q_{i\max}$ 为第 i 个闸坝工程设计最大过水能力, m^3/s 。

3.3 求解方法

(1) NSGA-II 算法。NSGA-II 算法是通过非支配排序, 将引水方案与闸坝调度策略划分为不同 Pareto 前沿层级, 结合拥挤度距离计算维持解集多样性, 有效平衡水位调控、水质改善、效率提升、成本削减等多维目标。算法具体参数设置为采用精英保留策略融合父代与子代形成规模为 40 的混合种群, 通过二元锦标赛选择机制确保优秀个体留存, 最大迭代次数为 50 代。交叉算子使用模拟二进制交叉, 交叉概率 100%, 实现遗传信息充分交换, 结合多项式变异增强局部搜索能力, 变异概率 5.6%。在优化机制设计方面, 通过设置初始化参考点和约束处理机制双策略, 缩小所

有可行域范围。初始化参考点参考宿迁黄河故道经验化调度规则, 设定引水工程开启时长、闸坝群启闭时序等关键参数的初始值域, 引导算法快速聚焦潜在可行区域。同时, 构建基于惩罚函数的约束强化机制, 通过设置水位不超汛限水位和最大补水周期等约束条件, 利用惩罚函数将决策变量不可行度嵌入目标函数, 实现可行域的动态收缩。

(2) 熵权法。为了综合评价 Pareto 解集最优解, 采用熵权法^[8]客观量化目标权重。通过标准化处理各方案中水位、水质、效率、成本四项目标指标, 消除量纲差异对权重计算的干扰, 构建目标矩阵计算各指标在全解集中的信息熵值, 依据信息熵与权重的反比关系, 确定各目标客观权重系数, 将多维目标转化为可量化比较的综合评价函数, 实现对 Pareto 解集的科学筛选。

4 调度优化结果与分析

4.1 Pareto 最优解集

按照多水源—闸坝群联合调度优化模型求解得到宿迁黄河故道多水源—闸坝群联合调度的 Pareto 最优解集, 见图 5(a)。由图 5(a) 可知, 不同目标组合的解分布离散, 表明成本、效率、水质、水位四类目标间存在显著的多目标冲突特性。其中, 成本与效率总体呈反向制约关系, 提升调度效率伴随着水量和能耗成本增加, 严控成本则限制调度效率的提升; 水质与水位指标呈非单调性响应特征, 水位上升有助于提高水体自净能力, 但受闸坝调度影响改变水流状态时, 易对水质产生负面影响; 效率与水位指标存在正向协同优化区间, 通过合理调度策略, 可使调度效率与水位达标情况同步提升; 成本与水质指标呈现相互约束特性, 为保障水质达到理想状态, 需大量投入补水成本。

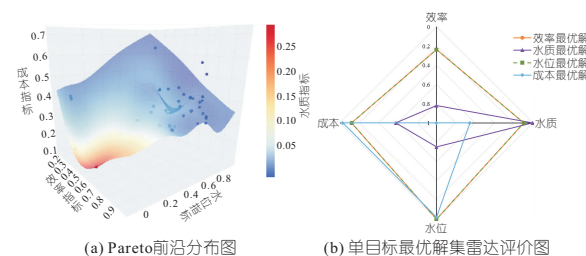


图 5 Pareto 前沿分布图和单目标最优解集雷达评价图

Fig. 5 Pareto frontier distribution and radar evaluation chart of single-objective optimal solution set

对比分析成本、效率、水质、水位四类单目标函数最优解, 构建雷达评价图(图 5(b))。结果表明, 水位与效率最优解的调度策略一致, 该方案通过强化配水响应速度与水位调控精度, 使水位和

效率目标值分别达到 0、0.24,但调度周期内水质和成本目标值降至 0.09、0.12,反映出“水位—效率导向型”调度对水质与成本目标的抑制效应;水质最优解实现了全程水质达标,但因长时间、大规模的水源补给导致成本目标值攀升至 0.58,同时效率和水位目标值分别升至 0.82、0.75,凸显出“水质优先”策略对成本投入、调度效率与水位调控精度的多重约束;成本最优解简化了调控流程,压缩了引水工程能耗,使成本目标值降至 0.03,但水质和效率目标值分别提升至 0.65、1.00,展现了“成本约束”与“水质—效率”的权衡关系,见表 3。

表 3 单目标最优调度策略

Tab.3 Single-objective optimal scheduling strategy

最优解类型	水位目标值	水质目标值	效率目标值	成本目标值
水位最优解	0.00	0.09	0.24	0.12
水质最优解	0.75	0.00	0.82	0.58
效率最优解	0.00	0.09	0.24	0.12
成本最优解	0.02	0.65	1.00	0.03

4.2 最优调度策略

基于熵权法客观量化四项目标权重,结果显示水位、水质、效率、成本的权重分别为 70.76%、15.83%、8.56%、4.85%,并得到综合最优调度策略下四项目标值分别为 0、0.09、0.24、0.12。根据综合最优调度策略,宿迁黄河故道多水源—闸坝群联合调度周期为 29 h,B~H 闸坝站中,C 闸站于调度开始 40 min 后开启,其余闸坝站随调度启动同步开启,具体工程调度规则见图 6(a)。在此调度策略下,全河段水位指标和水质指标均达到目标要求,仅出现 2.61 h 短时水质超标现象。调度完成后水源补水水量为 $266.88 \times 10^4 \text{ m}^3$,总

成本为 26.95 万元,各引水泵站引水水量和成本分布见图 6(b),该调度策略实现了生态保护、运行效率与经济效益的协同优化。

5 结论

基于水动力—水质耦合模型、多目标优化模型和 NSGA-II 算法构建了多水源—闸坝群联合调度优化模型,在水位控制和水质保障目标基础上,将补水效率和经济成本纳入优化目标体系,借助模型循环迭代机制和熵权法客观量化目标权重,筛选出综合最优调度方案,为闸坝群生态补水调度提供了“模型耦合—多目标优化—权重决策”完整技术路径。目前,研究仅考虑无降雨且河段水质浓度均一的工况,因此闸坝群调度结果呈现单一的逆序调度模式,但其方法为类似河网地区解决复杂工况下多水源—闸坝群调度中的目标冲突问题提供了参考。

参考文献:

[1] 李晓,唐洪武,王玲玲,等. 平原河网地区闸泵群联合调度水环境模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 393-399. (LI X, TANG H W, WANG L L, et al. Simulation of water environment under joint operation of gates and pumps in plain river network area[J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2016, 44(5): 393-399. (in chinese))

[2] 杨帆,黄玄,范子武,等. 城市河网工程群多目标联合调度优化模型[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(9): 38-46. (YANG F, HUANG X, FAN Z W, et al. Multi-objective joint optimal regulation model of water works group in urban river network areas[J]. China flood & drought management, 2024, 34(9): 38-46. (in chinese))

[3] 杨柳,杨侃,杨哲. 基于加速多蚁群算法的三峡水电站短期优化调度[J]. 人民长江, 2025, 56(4): 33-40. (YANG L, YANG K, YANG Z. Short-term optimal operation of Three Gorges Hydropower Station based on accelerated multiple ant colony algorithm[J]. Yangtze River, 2025, 56(4): 33-40. (in chinese))

[4] FU X, MEI Y D, XIAO Z H. Assessing flood risk using reservoir flood control rules[J]. Journal of earth science, 2016, 27(1): 68-73.

[5] LIU R M, LIU Y, JIAO L J, et al. Multi-objective optimization of reservoir group operation after Inter-basin water transfer jointing SWAT model and NSGA-II [J]. Journal of hydrology, 2025, 660: 133431.

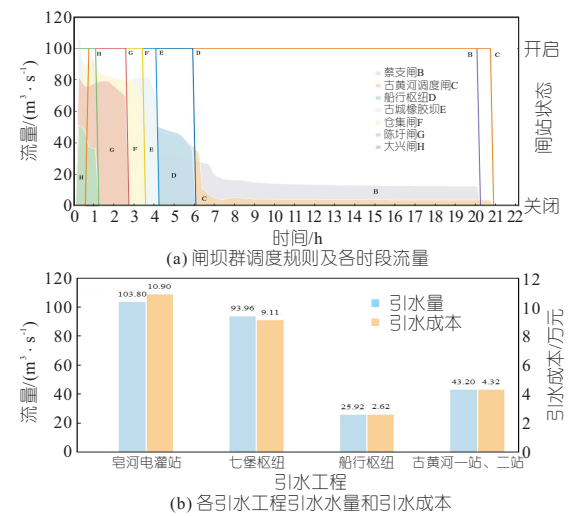


图 6 闸坝群调度规则及各时段流量和各引水工程引水水量和引水成本
Fig.6 Scheduling rules and flow charts of gate-dam groups in each period and water diversion quantity and cost charts of each water diversion project

- method for dam deformation monitoring data based on similar measurement point comparison[J]. Advances in science and technology of water resources, 2024, 44(4): 72-77. (in Chinese))
- [6] 郑霞忠, 陈国梁, 邹韬. 考虑时间序列关联的大坝监测异常数据清洗[J]. 水力发电, 2020, 46(4): 111-114, 125. (ZHENG X Z, CHEN G L, ZOU T. Cleaning of abnormal dam monitoring data considering time series association[J]. Water power, 2020, 46(4): 111-114, 125. (in Chinese))
- [7] 李川洲. 基于关联规则和机器学习的大坝监测异常数据自适应识别方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023. (LI C Z. Research on adaptive identification method for abnormal data of dam monitoring based on association rules and machine learning[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023. (in Chinese))
- [8] 戴领, 李少林, 刘光彪, 等. 基于 LV-DBSCAN 算法的大坝安全监测数据异常检测[J]. 人民长江, 2024, 55(1): 236-241. (DAI L, LI S L, LIU G B, et al. Detection of abnormal values in dam safety monitoring data based on LV-DBSCAN algorithm [J]. Yangtze River, 2024, 55(1): 236-241. (in Chinese))
- [9] 蒋齐嘉, 蒋中明, 唐栋, 等. 基于 SSA-DBSCAN 的边坡安全监测数据粗差探测方法[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(4): 85-90, 98. (JIANG Q J, JIANG Z M, TANG D, et al. Gross error detection of slope safety monitoring data based on SSA-DBSCAN[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2022, 39(4): 85-90, 98. (in Chinese))
- [10] 李元梦, 李登华, 丁勇. 基于 DBSCAN 的大坝安全监测异常数据检测算法[J]. 水电能源科学, 2024, 42(1): 149-152. (LI Y M, LI D H, DING Y. Abnormal data detection algorithm for dam safety monitoring based on DBSCAN[J]. Water resources and power, 2024, 42(1): 149-152. (in Chinese))
- [11] 李秉晨, 于惠钧, 刘靖宇. 基于 Kmeans 和 CEEMD-PE-LSTM 的短期光伏发电功率预测[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 204-208. (LI B C, YU H J, LIU J Y. Prediction of short-term photovoltaic power generation based on Kmeans and CEEMD-PE-LSTM[J]. Water resources and power, 2021, 39(4): 204-208. (in Chinese))
- [12] 雷未, 王建, 吉同元, 等. 基于深度学习框架的长序列大坝监测缺失数据插补模型[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 82-88. (LEI W, WANG J, JI T Y, et al. Long-series missing data interpolation model for dam monitoring based on deep learning framework[J]. Advances in science and technology of water resources, 2023, 43(6): 82-88. (in Chinese))
- [13] 欧阳慧泉, 杨峰, 单定军, 等. 基于 SSA-VMD-WDCNN 的水电机组故障诊断[J]. 水电能源科学, 2024, 42(12): 147-151. (OUYANG H Q, YANG F, SHAN D J, et al. Fault diagnosis of hydropower unit based on SSA-VMD-WDCNN[J]. Water resources and power, 2024, 42(12): 147-151. (in Chinese))
- [14] 徐浩, 刘怀利, 瞿暄. 基于孤立森林的取水数据异常值检测[J]. 水电能源科学, 2024, 42(9): 29-32, 59. (XU H, LIU H L, QU X. Detecting abnormal water extraction data based on isolation forest[J]. Water resources and power, 2024, 42(9): 29-32, 59. (in Chinese))
- [15] QIAN H M, ZHANG C, TAO C C, et al. Multi-scale entropy based damage detection for thermal protection structures with variation of ambient temperature[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2023, 34(10): 1211-1223.
- [16] LESOUPLE J, BAUDOUIN C, SPIGAI M, et al. Generalized isolation forest for anomaly detection[J]. Pattern recognition letters, 2021, 149: 109-119.
- [17] 张瑜, 秦学, 彭浩. 基于平滑阈值与孤立森林的大坝监测数据异常检测[J]. 人民黄河, 2025, 47(3): 141-145. (ZHANG Y, QIN X, PENG H. Anomaly detection of dam monitoring data based on smoothing threshold and isolated forest[J]. Yellow River, 2025, 47(3): 141-145. (in Chinese))
- *****
- (上接第 216 页)
- [6] 王思如, 姚轶, 刘米雪, 等. 基于水动力模型的城市水网一体化优化方法及其应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(5): 1079-1089. (WANG S R, YAO Y, LIU M X, et al. Optimization method and its application of urban water network integration based on hydrodynamic model[J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2025, 23(5): 1079-1089. (in Chinese))
- [7] 王文琪, 王思如, 罗嘉西, 等. 多水源补给的宿迁市黄河故道水量—水质耦合优化调控[J]. 人民黄河, 2023, 45(7): 68-72, 78. (WANG W Q, WANG S R, LUO J X, et al. Optimal regulation of coupling water quantity and water quality in old Yellow River channel in Suqian City with multi water supply[J]. Yellow River, 2023, 45(7): 68-72, 78. (in Chinese))
- [8] ZHONG H, WU S, YAN M, et al. Derivation of optimal scheduling strategies for large-scale inter-basin water transfer projects considering streamflow wet-dry encounter uncertainty of multiple reservoirs [J]. Journal of hydrology, 2025, 662(PA): 133784-133784.